

УДК 678.046.3

О. М. Касперович, А. Ф. Петрушеня, Л. А. Ленартович, А. В. Чернявский
Белорусский государственный технологический университет

ПОЛИОЛЕФИНОВЫЕ КОМПОЗИЦИИ, МОДИФИЦИРОВАННЫЕ АЛЮМОСИЛИКАТАМИ

В настоящей работе исследована возможность получения полимерных композиций на основе полиэтилена низкой плотности марки LDPE PCG00 (производитель Sabic) методом экструзионного компаундирования с использованием в качестве функциональной добавки алюмосиликата – бентонитовой глины, модифицированной органическими модификаторами. В рамках исследования была разработана методика модификации бентонитовой глины, направленная на уменьшение ее гидрофильности с применением различных типов модификаторов – кокотриметиламмония хлорида марки Arquad 35 и N-цетилпиридиния бромид. Также была предложена технология введения модифицированной глины в полиолефиновую матрицу, которая включает предварительную стадию получения суперконцентрата на основе модифицированной бентонитовой глины и малеинизированного полиэтилена с содержанием глины в суперконцентрате 30 мас. % и введения его в полимер в заданном процентном соотношении. Исследованы деформационно-прочностные свойства полученных по данной технологии композиций, а также определена перерабатываемость данного материала стандартными методами. Оценена эффективность примененных модификаторов путем определения совместимости глины с полимером по комплексу физико-механических свойств полученного композита.

Ключевые слова: полимерная композиция, глина, модификация, суперконцентрат, совместимость.

Для цитирования: Касперович О. М., Петрушеня А. Ф., Ленартович Л. А., Чернявский А. В. Полиолефиновые композиции, модифицированные алюмосиликатами // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, полимерное материаловедение. 2026. № 1 (301). С. 120–127. DOI: 10.52065/2520-2669-2026-301-11.

V. M. Kasperovich, A. F. Petrushenya, L. A. Lenartovich, A. V. Chernyavsky
Belarusian State Technological University

POLYOLEFIN COMPOSITIONS MODIFIED WITH ALUMINOSILICATES

In this work, the possibility of obtaining polymer compositions based on low-density polyethylene of the LDPE PCG00 brand, manufactured by Sabic, by the method of extrusion compounding, using bentonite clay modified with organic modifiers as a functional additive of aluminosilicate. As part of the study, a technique for modifying bentonite clay was developed, aimed at reducing its hydrophilicity using various types of modifiers – Arquad 35 cocotrimethylammonium chloride and N-cetylpyridinium bromide. A technology for introducing modified clay into a polyolefin matrix has also been proposed, which includes a preliminary stage for producing a superconcentrate based on modified bentonite clay and maleinated polyethylene, with a clay content of 30 wt. % in the superconcentrate, and its introduction into the polymer in a given percentage. The deformation and strength properties of the compositions obtained using this technology have been studied, and the recyclability of this material by standard methods has been evaluated. The effectiveness of the applied modifiers was evaluated by determining the compatibility of clay with polymer according to the complex of physico-mechanical properties of the resulting composite.

Keywords: polymer composition, clay, modification, superconcentrate, compatibility.

For citation: Kasperovich V. M., Petrushenya A. F., Lenartovich L. A., Chernyavsky A. V. Polyolefin compositions modified with aluminosilicates. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Polymer Materials Science*, 2026, no. 1 (301), pp. 120–127 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-2669-2026-301-11.

Введение. Композиционные материалы (КМ) на основе полимерных материалов, модифицированных алюмосиликатами, представляют собой перспективное направление в сфере материаловедения, так как последние обладают уникальными физико-химическими свойствами

и широкой областью применения. КМ, полученные с использованием алюмосиликатов, имеют более высокие прочностные характеристики, термостойкость, огнестойкость, а также обладают барьерными свойствами по отношению к газам.

Бентонитовые глины, относящиеся к алюмосиликатам, имеют широкий спектр применений, поскольку являются недорогим, экологически чистым и безопасным материалом.

Стоит отметить, что слоистые силикаты имеют толщину слоя порядка 1 нм и очень высокое соотношение линейных размеров к поперечным, что придает им свойства наноразмерных наполнителей с высокой удельной поверхностью. Подобные особенности глинистых наполнителей позволяют существенно изменять свойства нанокompозитов даже при небольшом содержании наполнителя в материале. К тому же поверхность глины можно модифицировать с помощью реакций ионного обмена с различными неорганическими и органическими катионами, что придает им уникальные свойства.

Существуют определенные трудности в смачиваемости гидрофильных глин гидрофобным полимером, интеркаляции полимера в межслойное пространство глины и распределении глины в высоковязкой полимерной матрице, поэтому для улучшения совместимости необходима модификация глины с целью придания ей гидрофобности [1–10].

Если говорить о введении бентонитовых глин в полимерную матрицу, то они активно используются в терморезактивных полимерах [11, 12]. Известны способы внесения бентонитовых глин в каучук [13], а также в полярные термопласты [14]. Однако при применении в качестве полимерной матрицы полиолефинов задача получения композита становится довольно сложной. Высокая вязкость и химическая нейтральность полиолефинов затрудняют равномерное распределение глин в процессе смешивания, что негативно сказывается на механических свойствах конечного продукта, поэтому необходимо использование пластифицирующих и компатибилизирующих добавок для устранения этой проблемы [15–20].

Поэтому с нашей точки зрения основной задачей, которую необходимо решить при создании полиолефиновых композиций, наполненных бентонитовыми глинами, является необходимость определить подходящий органический модификатор, с помощью которого можно обеспечить более высокую термодинамическую совместимость глины с полимерной матрицей, и найти подходящие параметры переработки, при которых одновременно с формированием изделий будет обеспечиваться эффективное распределение слоев глины в полимерной матрице.

Основная часть. Целью данной работы являлось сравнение действия различных по структуре органических модификаторов бентонитовой глины на совместимость ее с полимером при получении полиэтиленовых композиций. Оценка эффективности модификации глины проводилась путем определения совместимости глины с полимером по комплексу физико-механических свойств полученного композита.

Объектом исследования являлись композиции на основе полиэтилена низкой плотности марки LDPE PCG00 (производитель Sabic) в виде гранул. В качестве наполнителя использовали бентонитовую глину с площадью удельной поверхности до 392,98 м²/г в случае плоской ориентации. В качестве модификаторов бентонитовой глины в данном исследовании применялось четвертичное аммониевое соединение – кокотриметиламмония хлорид марки Arquad 35 и N-цетилпиридиния бромид. Кокотриметиламмония хлорид характеризуется следующим составом углеродного скелета: 6% C₁₀, 50% C₁₂, 19% C₁₄. Цетилпиридиния бромид имеет молекулярную формулу следующего вида: C₂₁H₃₈BrN. Структурные формулы приведены на рис. 1.

Модификация должна была увеличить расстояние между слоями бентонита, придать глине органophilность и облегчить условия распределения бентонита в полимерной матрице.

Для введения модифицированной глины в полимерную матрицу был приготовлен суперконцентрат, который включал модифицированную бентонитовую глину и малеинизированный полиэтилен. В случае использования малеинизированного полиэтилена предполагалось

увеличение адгезионного взаимодействия полимерной матрицы с наполнителем вследствие наличия адгезионно-активных ангидридных групп в его составе и одновременного сродства маленизированного полимера с основной полимерной матрицей. Содержание глины в суперконцентрате составляло 30 мас. %.

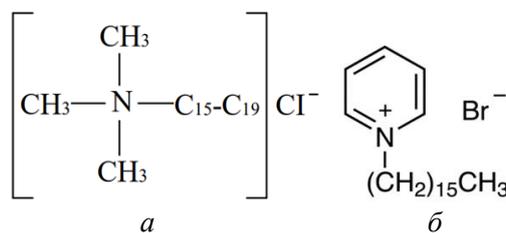


Рис. 1. Структурные формулы модификаторов:
a – кокотриметиламмония хлорид;
б – цетилпиридиния бромид

Суперконцентрат вводился в полимерную матрицу в заданном процентном соотношении при помощи двухшнекового экструдера. В композициях на основе полиэтиленовой матрицы содержание бентонитовой глины составляло: 0,25; 0,5; 1,0 и 1,5 мас. %. Полученные в ходе экструдирования гранулы использовались для изготовления на термопластавтомате стандартных образцов для испытаний.

Для оценки эффективности модифицирования бентонитовых глин (кокотриметиламмония хлоридом (БГ_{М1}) и N-цетилпиридиния бромидом (БГ_{М2})) в полиэтиленовой матрице проводились испытания физико-механических характеристик полученных композитов. Испытания на растяжение выполнялись в соответствии с ГОСТ 11262–2017 [21] при скорости деформирования 100 мм/мин.

Физико-механические свойства композиций БГ_{М1} и БГ_{М2}

Композиция ПЭ/ПЭМ/БГ _М , мас. %	Прочность при разрыве, МПа	Деформация при разрыве, %	Модуль упругости при растяжении, МПа
Исходный полимер			
LDPE PCG00	27,01	521,63	210,00
Композиции с БГ _{М1} – кокотриметиламмония хлоридом			
99,17/0,58/0,25	31,10	502,50	218,30
98,33/1,17/0,5	31,41	472,60	221,10
96,67/2,33/1,0	31,62	468,80	243,50
95,0/3,5/1,5	31,70	429,60	257,90
Композиции с БГ _{М2} – цетилпиридиния бромидом			
99,17/0,58/0,25	21,45	413,40	256,80
98,33/1,17/0,5	21,67	433,40	266,20
96,67/2,33/1,0	21,63	456,20	268,10
95,0/3,5/1,5	21,84	486,80	258,90

Результаты исследования (таблица) демонстрируют существенное влияние типа модификатора бентонитовой глины на физико-механические характеристики полиэтиленовых композитов. Применение кокотриметиламмония хлорида в качестве модификатора приводит к систематическому возрастанию прочностных показателей композиционного материала. Уже при введении 0,25 мас. % БГ_{М1} наблюдается увеличение прочности при разрыве на 15%, при этом максимальный прирост прочности составляет 17,4% при содержании наполнителя 1,5 мас. %. Параллельно фиксируется снижение относительного удлинения при разрыве на 17,6%. Модуль упругости демонстрирует монотонный рост от 218,3 МПа (при 0,25 мас. %) до 257,9 МПа (при 1,5 мас. %), что соответствует увеличению на 22,8% относительно исходного полимера (210,0 МПа).

В случае использования N-цетилпиридиния бромида в качестве модификатора наблюдается иная картина изменения свойств. Прочностные характеристики первоначально снижаются на 20,5% при содержании 0,25 мас. % БГ_{М2}, сохраняясь на уровне ниже исходного на 19,1% даже при максимальной концентрации наполнителя. Деформационные характеристики отражают сложную зависимость: начальное снижение относительного удлинения сменяется его ростом до 486,8% (при 1,5 мас. % БГ_{М2}).

Наиболее значительный эффект наблюдается для модуля упругости, который достигает максимального значения 268,1 МПа при содержании 1,0 мас. % БГ_{М2}, что на 11,7% превышает аналогичный показатель для композитов с кокотриметиламмония хлоридом и на 27,7% выше значения исходного полимера.

Известно, что с увеличением концентрации наполнителя вязкость термопластичного материала значительно возрастает, что затрудняет выбор метода переработки таких композиций. Поэтому в ходе данной работы был определен показатель текучести расплава согласно ГОСТ 11645–2021 [22] при температуре испытаний 190°C, с использованием груза массой 2,16 кг.

Графические зависимости показателя текучести расплава (ПТР) от содержания бентонитовой глины представлены на рис. 2.

Результаты показали, что в случае композитов с кокотриметиламмония хлоридом наблюдается плавное снижение ПТР по мере увеличения содержания наполнителя. При 1,5 мас. % БГ_{М1} снижение ПТР составило всего 12,45%. Такое незначительное изменение реологических характеристик можно объяснить влиянием малеинизированного полиэтилена, показатель текучести которого составляет 2,4 г/10 мин и который выступает в роли компатибилизатора.

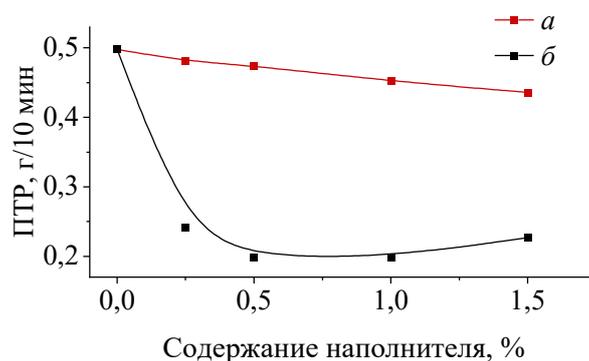


Рис. 2. Зависимость ПТР от содержания наполнителя:
а – БГ_{М1} – кокотриметиламмония хлорид;
б – БГ_{М2} – цетилпиридиния бромид

Напротив, системы с цетилпиридиния бромидом демонстрируют более выраженное изменение реологических свойств. Уже при содержании 0,25 мас. % БГ_{М2} значение ПТР снижается более чем в 2 раза (до 0,242 г/10 мин), достигая минимального значения 0,198 г/10 мин при 0,5 мас. % наполнителя. Такое значительное увеличение вязкости расплава свидетельствует о формировании более жесткой структуры композита, что согласуется с полученными ранее данными о максимальных значениях модуля упругости для этих систем.

Применение метода дифференциальной сканирующей калориметрии, совмещенной с методом термогравиметрии, позволяет определять энергетические эффекты, наблюдаемые при различных экзотермических (кристаллизация, окисление) и эндотермических (плавление, деструкция) процессах, а также оценивать изменения массы полимера в зависимости от температуры в результате протекания химических процессов.

Для сравнения были выбраны образцы исходного полиэтилена и полиэтилена с содержанием 0,25 мас. % БГ_{М1}. При введении БГ_{М1} интервал плавления расширился на 3°C, температура окончания плавления возросла на 6°C, что может свидетельствовать об изменении

доли кристаллической фракции. Температура начала окисления не изменилась при введении модифицированной бентонитовой глины, однако температура начала деструкции значительно увеличилась (на 40°C) по сравнению с исходным полиэтиленом. Также повысилась температура разложения и 50%-ной потери массы. Полученные данные свидетельствуют о том, что интенсивность окислительных процессов, протекающих в полиэтилене, содержащем 0,25 мас. % БГ_{М1}, гораздо ниже.

Заключение. На основании проведенного анализа можно заключить, что исследуемые модификаторы оказывают различное влияние на структуру и свойства композиционных материалов. Введение кокотриметиламмония хлорида способствует эффективному диспергированию силикатных частиц в полимерной матрице вследствие компактных молекулярных размеров модификатора. Это приводит к формированию протяженных граничных слоев с упорядоченной ориентацией макромолекул полимера на поверхности глины, что усиливает межмолекулярные взаимодействия и обеспечивает сбалансированное улучшение механических характеристик.

Напротив, N-цетилпиридиния бромид с его протяженным алкильным радикалом демонстрирует иной механизм действия. Образование выраженного межфазного слоя с повышенной жесткостью, с одной стороны, объясняет достижение высоких значений модуля упругости (до 268,1 МПа), но с другой – приводит к микрогетерогенности структуры. Это проявляется в снижении прочностных характеристик из-за образования агломератов и сопутствующих дефектов структуры, однако также и в неожиданном частичном восстановлении деформационных характеристик. При этом наблюдаемое увеличение модуля упругости может быть связано с наноструктурирующим действием частиц глины, способствующим увеличению доли кристаллической фазы и формированию более плотной упаковки макромолекулярных цепей в полимерной матрице. Рост деформации же можно объяснить формированием дополнительных путей для деформации материала вокруг агломератов, а также изменением характера межфазного взаимодействия при высоких концентрациях модификатора.

Проведенный сравнительный анализ позволяет заключить, что кокотриметиламмония хлорид обеспечивает как повышение деформационно-прочностных, улучшение термических характеристик, так и сохранение технологических параметров композиционного материала. В то время как цетилпиридиния бромид, несмотря на выраженное упрочняющее действие, вызывает значительное ухудшение перерабатываемости.

Список литературы

1. Giannelis E. P., Krishnamoorti R., Manias E. Polymer-silicate nanocomposites: model systems for confined polymers and polymer science // *Advances in polymer science*. 1999. Vol. 138. P. 107–147.
2. LeBaron P. C., Wang Z., Pinnavaia T. J. Polymer-layered silicate nanocomposites: an overview // *Applied clay science*. 1999. Vol. 15. P. 11–29.
3. Alexandre M., Dubois P. Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials // *Materials science and engineering*. 2000. Vol. 28. P. 1–63.
4. Krishnamoorti R., Vaia R. *Polymer nanocomposites: synthesis, characterization, and modeling*. Oxford: Oxford university press, 2002. 237 p.
5. Pinnavaia T., Beall G. *Polymer-clay nanocomposites*. New York: Wiley, 2000. 376 p.
6. Vaia R. A., Giannelis E. P. Polymer nanocomposites: status and opportunities // *MRS bulletin*. 2001. Vol. 26. P. 394–401.
7. Kickelbick G. Concepts for the incorporation of inorganic building blocks into organic polymers on a nanoscale // *Progress in polymer science*. 2003. Vol. 28. P. 83–114.
8. Sinha Ray S., Okamoto M. Polymer/Layered silicate nanocomposite: from preparation to processing // *Progress in polymer science*. 2003. Vol. 28. P. 1539–1641.

9. Thermal, morphological and mechanical properties of multifunctional composites based on biodegradable polymers/bentonite / B. M. Antonio [et al.] // *Renewable and sustainable polymers*. 2023. Vol. 15. P. 3443.

10. Панасюгин А. С., Цыганов А. Р., Машерова Н. П. Модифицированные глины как сорбенты, катализаторы, носители активных каталитических фаз. Минск: БГТУ, 2022. 198 с.

11. Influence of the organophilisation process on properties of the bentonite and mechanical properties of the clay/epoxy nanocomposites / A. Rapacz-Kmita [et al.] // *Archives of Metallurgy and Materials*. 2016. Vol. 61. P. 875–880.

12. Tijen S., Ulku Y. Modification and characterization of bentonite with quaternary ammonium and phosphonium salts and its use in polypropylene nanocomposites // *Thermoplastic Composite Materials*. 2013. Vol. 28. P. 1–25.

13. Synthesis and properties of silicone rubber/organomontmorillonite hybrid nanocomposites / S. Wang [et al.] // *Journal of applied polymer science*. 1998. Vol. 69. P. 1557–1561.

14. Shen Y. H. Preparation of organobentonite using nonionic surfactants. Netherlands: Chemosphere, 2001. 995 p.

15. Effect of clay treatment on the thermal degradation of PHB based nanocomposites / R. P. Ollier [et al.] // *Applied Clay Science*. 2016. Vol. 163. P. 146–152.

16. Modification of monomillonite fillers by ionizing radiation / Z. Zbigniew [et al.] // *Radiation physics and chemistry, Radiation technology*. 2007. Vol. 76. P. 34–35.

17. Nanoscale highly filled epoxy nanocomposite / N. Salahuddin [et al.] // *European polymer journal*. 2002. Vol. 38. P. 1477–1482.

18. Kim J.-T., Oh T.-S., Lee D.-H. Preparation and characteristics of nitrile rubber (NBR) nanocomposites based on organophilic layered clay // *Polymer International*. 2003. Vol. 52. P. 1058–1063.

19. Fornes T., Paul D. Structure and properties of nanocomposites based on nylon-11 and -12 compared with those based on nylon-6 // *Macromolecules*. 2004. Vol. 37. P. 1698–1709.

20. Schmidt D., Shah D., Giannelis E. New advances in polymer/layered silicate nanocomposites // *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2002. Vol. 6. P. 205–212.

21. Пластмассы. Метод испытания на растяжение: ГОСТ 11262–2017. М.: Стандартинформ, 2018. 20 с.

22. Пластмассы. Метод определения показателя текучести расплава термопластов: ГОСТ 11645–1973. М.: Изд-во стандартов, 1994. 12 с.

References

1. Giannelis E. P., Krishnamoorti R., Manias E. Polymer-silicate nanocomposites: model systems for confined polymers and polymer science. *Advances in polymer science*, 1999, vol. 138, pp. 107–147.

2. LeBaron P. C., Wang Z., Pinnavaia T. J. Polymer-layered silicate nanocomposites: an overview. *Applied clay science*, 1999, vol. 15, pp. 11–29.

3. Alexandre M., Dubois P. Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials. *Materials science and engineering*, 2000, vol. 28, pp. 1–63.

4. Krishnamoorti R., Vaia R. Polymer nanocomposites: synthesis, characterization, and modeling. Oxford, Oxford university press, 2002. 237 p.

5. Pinnavaia T., Beall G. Polymer-clay nanocomposites. New York, Wiley, 2000. 376 p.

6. Vaia R. A., Giannelis E. P. Polymer nanocomposites: status and opportunities. *MRS bulletin*, 2001, vol. 26, pp. 394–401.

7. Kickelbick G. Concepts for the incorporation of inorganic building blocks into organic polymers on a nanoscale. *Progress in polymer science*, 2003, vol. 28, pp. 83–114.

8. Sinha Ray S., Okamoto M. Polymer/Layered silicate nanocomposite: from preparation to processing. *Progress in polymer science*, 2003, vol. 28, pp. 1539–1641.

9. Antonio B. M., Afonso H. S. J., Carlos R. S. O., Washington M. Thermal, morphological and mechanical properties of multifunctional composites based on biodegradable polymers/bentonite. *Renewable and sustainable polymers*, 2023, vol. 15, p. 3443.
10. Panasyugin A. S., Tsyganov A. R., Masherova N. P. *Modifitsirovannyye gliny kak sorbenty, katalizatory, nositeli aktivnykh kataliticheskikh faz* [Modified clays as sorbents, catalysts, carriers of active catalytic phases]. Minsk, BGTU Publ., 2022. 198 p. (In Russian).
11. Rapacz-Kmita A., Moskla N., Dudek M., Gajek M., Mandecka-Kamien L. Influence of the organophilisation process on properties of the bentonite and mechanical properties of the clay/epoxy nanocomposites. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2016, vol. 61, pp. 875–880.
12. Tijen S., Ulku Y. Modification and characterization of bentonite with quaternary ammonium and phosphonium salts and its use in polypropylene nanocomposites. *Thermoplastic Composite Materials*, 2013, vol. 28, pp. 1–25.
13. Wang S., Long Ch., Wang X., Li Q., Qi Z. Synthesis and properties of silicone rubber/organomontmorillonite hybrid nanocomposites. *Journal of applied polymer science*, 1998, vol. 69, pp. 1557–1561.
14. Shen Y. H. Preparation of organobentonite using nonionic surfactants. Netherlands, Chemosphere, 2001. 995 p.
15. Ollier R. P., D'Amico D. A., Schroeder W. F., Cyrus V. P., Alvarez V. A. Effect of clay treatment on the thermal degradation of PHB based nanocomposites. *Applied Clay Science*, 2016, vol. 163, pp. 146–152.
16. Zbigniew Z., Grażyna P., Andrzej N., Krzysztof M. Modification of monomorillonite fillers by ionizing radiation. *Radiation physics and chemistry, Radiation technology*, 2007, vol. 76, pp. 34–35.
17. Salahuddin N., Moet A., Hiltner A., Baer E. Nanoscale highly filled epoxy nanocomposite. *European polymer journal*, 2002, vol. 38, pp. 1477–1482.
18. Kim J.-T., Oh T.-S., Lee D.-H. Preparation and characteristics of nitrile rubber (NBR) nanocomposite based on organophilic layered clay. *Polymer International*, 2003, vol. 52, pp. 1058–1063.
19. Fornes T., Paul D. Structure and properties of nanocomposites based on nylon-11 and -12 compared with those based on nylon-6. *Macromolecules*, 2004, vol. 37, pp. 1698–1709.
20. Schmidt D., Shah D., Giannelis E. New advances in polymer/layered silicate nanocomposites. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2002, vol. 6, pp. 205–212.
21. GOST 11262–2017. Plastics. Tensile testing method. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 20 p. (In Russian).
22. GOST 11645–1973. Plastics. Method for determining the melt flow index of thermoplastics. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1994. 12 p. (In Russian).

Информация об авторах

Касперович Ольга Михайловна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: kasperovichvolha@yandex.by. SPIN-код: 7558-2597. Scopus ID: 6504122970. ORCID: 0000-0002-1203-5206.

Петрушеня Александр Федорович – кандидат технических наук, доцент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: petraf@belstu.by. SPIN-код: 8386-1599. ORCID: 0000-0002-0773-1792.

Ленартович Лилия Алексеевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: lenartovich@belstu.by. SPIN-код: 7184-4473. Scopus ID: 57203741487. ORCID: 0000-0001-7876-9184. ResearcherID: H-5796-2016.

Чернявский Алексей Викторович – магистрант кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: alexeychernavskiy2004@gmail.com.

Information about the authors

Kasperovich Volha Mikhaylovna – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kasperovichvolha@yandex.by. SPIN code: 7558-2597. Scopus ID: 6504122970. ORCID: 0000-0002-1203-5206.

Petrushenya Aleksandr Fedorovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: petraf@belstu.by. SPIN code: 8386-1599. ORCID: 0000-0002-0773-1792.

Lenartovich Liliya Alekseevna – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lenartovich@belstu.by. SPIN code: 7184-4473. Scopus ID: 57203741487. ORCID: 0000-0001-7876-9184. ResearcherID: H-5796-2016.

Chernyavsky Aleksey Viktorovich – Master’s degree student, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alexeychernavskiy2004@gmail.com.

Поступила 05.11.2025